

И. В. Хорохорина, О. С. Филимонова, С. И. Лазарев

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ОЧИСТКИ ХРОМСОДЕРЖАЩИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ РАСТВОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДЕИОНИЗАЦИОННЫХ И ЭЛЕКТРОДИАЛИЗНЫХ МЕТОДОВ РАЗДЕЛЕНИЯ

Ключевые слова: хромсодержащие промышленные растворы, разделение, мембрана, электродеионизация, электродиализ, гальваническое производство, технологическая схема, экономическая эффективность.

В статье рассмотрена разработанная авторами технологическая схема очистки хромсодержащих сточных вод гальванического производства, основанная на комплексном применении электродиализных и электродеионизационных методов разделения. Актуальность работы обусловлена высокой токсичностью соединений хрома, устойчивостью их форм в водных средах и необходимостью внедрения ресурсо- и энергоэффективных технологий очистки промышленных стоков в условиях ужесточения экологических требований. Ключевым элементом предложенной схемы является оригинальный электродеионизационный аппарат авторской конструкции, отличающийся увеличенной площадью разделения, повышенной производительностью и сниженной материалоемкостью по сравнению с существующими аналогами. В работе приведено подробное описание структуры и принципа функционирования технологической схемы, включающей стадии усреднения сточных вод, механической и тонкой фильтрации, электродиализного разделения с получением обессоленного потока и концентрата, а также глубокой электродеионизационной доочистки с контролем и корректировкой кислотно-щелочного баланса. Показана возможность селективного концентрирования ионов хрома с последующим извлечением или утилизацией концентрата, что позволяет существенно сократить объём отходов и снизить экологическую нагрузку на окружающую среду. Очищенная вода может быть возвращена в технологический цикл предприятия, способствуя снижению водопотребления. В рамках работы внимание уделено оценке экономической эффективности предложенной технологической схемы. Выполнен расчёт эксплуатационных затрат с учётом энергопотребления, амортизационных отчислений и затрат на обслуживание оборудования, а также определён потенциальный экономический эффект за счёт возврата очищенной воды и реализации извлечённых солей в качестве вторичного сырья. Полученные результаты свидетельствуют о технологической и экономической целесообразности применения разработанной схемы для очистки хромсодержащих сточных вод гальванических производств.

I. V. Khorokhorina, O. S. Filimonova, S. I. Lazarev

EFFICIENCY OF THE FLOW PROCESS FOR PURIFYING CHROMIUM-CONTAINING INDUSTRIAL SOLUTIONS USING ELECTRODEIONIZATION AND ELECTRODIALYSIS SEPARATION METHODS

Key words: chromium-containing industrial solutions, separation, membrane, electrodeionization, electrodialysis, galvanic production, process flow diagram, economic efficiency.

This article discusses a process flow diagram developed by the authors for the treatment of chromium-containing wastewater from electroplating operations, based on the combined use of electrodialysis and electrodeionization separation methods. The relevance of this work stems from the high toxicity of chromium compounds, the stability of their forms in aqueous media, and the need to implement resource- and energy-efficient technologies for treating industrial effluents amid increasingly stringent environmental requirements. A key element of the proposed scheme is an original electrodeionization unit of the author's design, characterized by an increased separation area, higher productivity, and reduced material consumption compared to existing analogues. The paper provides a detailed description of the structure and operating principle of the process scheme, which includes stages of wastewater equalization, mechanical and fine filtration, electrodialytic separation yielding a desalinated stream and a concentrate, as well as advanced electrodialysis post-treatment with control and adjustment of the acid-base balance. The possibility of selective concentration of chromium ions with subsequent extraction or utilization of the concentrate is demonstrated, which allows for a significant reduction in waste volume and a decrease in the environmental impact. The treated water can be returned to the plant's process cycle, contributing to a reduction in water consumption. The study focuses on evaluating the economic efficiency of the proposed process scheme. Operating costs were calculated, taking into account energy consumption, depreciation, and equipment maintenance costs, and the potential economic benefit was determined through the reuse of treated water and the sale of recovered salts as secondary raw materials. The results obtained demonstrate the technological and economic feasibility of applying the developed scheme for the treatment of chromium-containing wastewater from electroplating plants.

Введение

В условиях роста объемов промышленных сточных вод и ужесточения экологических требований особую актуальность приобретают технологии глубокой очистки растворов тяжелых металлов, сочетающие высокую эффективность, энергоэкономичность и экологическую безопасность. Существенную

проблему для гальванических производств представляют хромсодержащие промышленные воды, характеризующиеся высокой токсичностью, стойкостью соединений хрома. Традиционные реагентные способы, методы адсорбции, ионного обмена, мембранной фильтрации и электрохимической обработки, несмотря на широкое распространение, нередко характеризуются значительными эксплуатационными за-

тратами, образованием вторичных отходов и ограниченной селективностью по отношению к отдельным загрязняющим компонентам [1-4].

Одним из перспективных направлений в области водоочистки является процесс электродеионизации, основанный на совмещении ионообменных и электрохимических механизмов переноса ионов в электрическом поле [5]. Данный метод позволяет осуществлять непрерывное удаление растворенных солей и ионных примесей без применения химических реагентов для регенерации, что существенно снижает экологическую нагрузку и упрощает эксплуатацию очистных систем [6,7].

В последние годы наблюдается возрастающий интерес к разработке и модернизации электродеионизационных аппаратов, направленных на повышение степени очистки, снижение энергопотребления и расширение областей практического применения, в том числе при очистке технологических и промышленных сточных вод сложного состава [8,9]. Однако многие существующие конструкции характеризуются ограниченной адаптивностью к реальным условиям эксплуатации и недостаточной интеграцией в комплексные технологические схемы водоочистки.

В рамках настоящей работы разработан и исследован оригинальный электродеионизационный аппарат [10], на основе которого предложена комплексная технологическая схема очистки хромсодержащих сточных вод гальванического производства. Предлагаемая схема ориентирована на многостадийную обработку стоков с предварительной механической и мембранной подготовкой, последующим электролизным разделением и глубокой электродеионизационной очисткой. Особенностью разработанного решения является возможность селективного концентрирования ионов хрома с их последующим извлечением или утилизацией, а также возврат очищенной воды в производственный процесс. Целью данной статьи является описание и обоснование предложенной технологической схемы очистки хромсодержащих сточных вод, разработанной на базе авторского электродеионизационного аппарата, а также анализ ее функциональных и экологических преимуществ.

Анализ

Авторами разработан электроионитный аппарат, который может быть применен для разделения технологических растворов и сточных вод металлообрабатывающей, машиностроительной отраслей промышленности.

В качестве аппарата-аналога рассмотрен электроионитный аппарат, представленный в авторском свидетельстве СССР №701655, В01D 13/02, 1977 [11], со следующими недостатками: сложность сборки и загрузки ионообменной смолы в камеры обессоливания, низкая производительность и качество слабоминерализованного разделяемого (исходного) раствора, высокие энергозатраты на разделение слабоминерализованных растворов.

Прототип разработанного электроионитного аппарата представлен в патенте [12] и состоит из плоских последовательно расположенных камер обессоливания и концентрирования с ионообменной смолой, разделенные на первую и вторую камеры перегородкой корпуса, и образованные чередующимися анионообменными и катионообменными мембранами, переточные каналы снабжены соплами-турбулизаторами, крышки аппарата имеют форму с выступами для уплотнения ионообменной смолы, а мембранодержатели вставлены в пазы и зафиксированы крышками.

Недостатками прототипа являются: низкая производительность и качество разделения слабоминерализованного раствора, малая площадь разделения, высокая материалоемкость, сложность изготовления, сборки и обслуживания.

Электроионитный аппарат, разработанный авторами данной статьи, выполнен с увеличенной площадью фильтрации, за счет чего повышаются качество и эффективность разделения растворов (рис. 1). Технический результат – повышение производительности и качества разделения слабоминерализованных растворов, повышение площади разделения, снижение материалоемкости в единицу объема аппарата, простота изготовления, сборки и обслуживания.

В рамках работы было проведено исследование зависимости концентрации ионов Cr^{+6} в обессоленном растворе от времени процесса электродеионизации. Объектами исследований были выбраны модельные растворы $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, в которых концентрация ионов Cr(VI) составляла $0,02 \text{ кг/м}^3$. Между ячейками располагались ионообменные мембраны МА-41П и МК-40. Камеры заполнены ионообменными смолами различного состава: смешанный ионит, в котором отношении H^+/OH^- составляло 49-51%/51-49%; катионит; анионит. Рабочие параметры эксперимента: время – 10800 с; скорость потока – $5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$; плотность тока – 50 А/м^2 для смешанного ионита, 35 А/м^2 – для катионита, 30 А/м^2 – для анионита. Концентрацию ионов хрома (VI) определяли фотометрически.

В таблице 1 представлены результаты исследования. При анализе таблицы 1 установлено, что смешанная ионообменная смола обеспечивает более эффективное удаление ионов хрома (VI) из раствора в процессе электродеионизации, чем использование отдельных катионитов или анионитов. Это связано с тем, что в слое смешанной смолы одновременно присутствуют активные центры обоих типов — катионообменных и анионообменных, что обеспечивает одновременное удаление как катионных, так и анионных форм хрома. Такая комбинация способствует более полному и сбалансированному протеканию ионообменных реакций и снижает вероятность локального перенасыщения одного типа обменных групп. Кроме того, наличие катионитов и анионитов в непосредственном контакте ускоряет регенерацию смолы под действием электрического поля, что обеспечивает стабильность и долговечность работы слоя. В смешанном слое усиливается миграция ионов под воздействием электрического тока, что способствует интенсификации массопереноса.

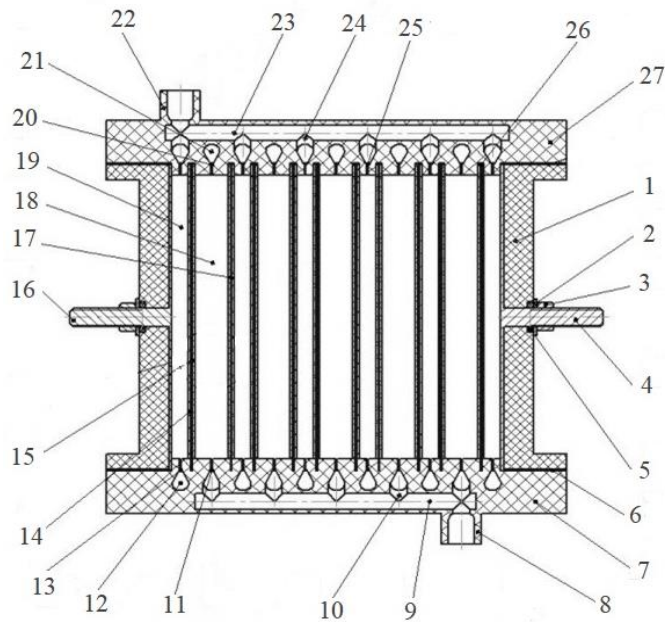


Рис. 1 – Электроионитный аппарат (разрез): 1 – корпус с перегородкой, 2 – прижимная шайба, 3 – прижимная гайка, 4 – катод, 5 – уплотнительное кольцо для герметизации выводов электродов, 6 – уплотнительная прокладка крышек, 7 – нижняя крышка с выступами, 8 – штуцер подачи исходного раствора, 9 – канал подачи исходного раствора, 10 – канал подачи исходного раствора в камеры разделения, 11 – сопло каналов диллюата, 12 – переточный канал концентрата, 13 – сопла переточного канала концентрата, 14 – мембранодержатель, 15 – катионообменная мембрана, 16 – анод, 17 – анионообменная мембрана, 18 – первая камера обессоливания, заполненной ионообменной смолой, 19 – первая камера концентрирования, заполненной ионообменной смолой, 20 – сопло переточных каналов диллюата, 21 – переточный канал диллюата, 22 – штуцер подачи раствора для концентрирования, 23, 24 – каналы подачи раствора для концентрирования в камеру концентрирования, 25 – сопло каналов раствора концентрата для создания турбулентных потоков и предотвращения сопутствующего уносу ионообменной смолы, 26 – паз для мембранодержателя, 27 – верхняя крышка с выступами

Fig. 1 – Electroionization apparatus (cross-section): 1 – housing with partition, 2 – clamping washer, 3 – clamping nut, 4 – cathode, 5 – sealing ring for sealing the electrode terminals, 6 – cover gasket, 7 – bottom cover with projections, 8 – feed port for the feed solution, 9 – feed channel for the feed solution, 10 – feed channel for the feed solution to the separation chambers, 11 – diluent channel nozzle, 12 – concentrate overflow channel, 13 – concentrate overflow channel nozzles, 14 – membrane holder, 15 – cation-exchange membrane, 16 – anode, 17 – anion-exchange membrane, 18 – first desalination chamber filled with ion-exchange resin, 19 – first concentration chamber filled with ion-exchange resin, 20 – diluent flow channel nozzle, 21 – diluate overflow channel, 22 – solution feed fitting for concentration, 23, 24 – channels for supplying the concentration solution to the concentration chamber, 25 – nozzle for the concentrate solution channels to create turbulent flows and prevent the associated entrainment of ion-exchange resin, 26 – groove for the membrane holder, 27 – top cover with projections

По результатам выполненных исследований предложена технологическая схема очистки сточных вод гальванического производства, содержащих соединения хрома, основанная на последовательном применении процессов механической фильтрации, электродиализа и электродеионизации (рис. 2).

Поступающие сточные воды направляются в резервуар-усреднитель, предназначенный для выравнивания расхода и стабилизации химического состава раствора. Из усреднительной емкости поток с помощью запорно-регулирующей арматуры и насосного оборудования подается на стадию предварительной очистки, включающую механический фильтр, где осуществляется удаление взвешенных частиц и масляных примесей.

Таблица 1 – Зависимость концентрации ионов хрома от времени электродеионизации

Table 1 – Relationship between chromium ion concentration and electrodeionization time

Время эксперимента, с	Концентрация ионов Cr ⁺⁶ , кг/м ³		
	Смешанная смола	Катионообменная смола	Анионообменная смола
0	0,02	0,02	0,02
1800	0,0042	0,0089	0,0101
3600	0,0015	0,005	0,0071
5400	0,00021	0,0032	0,0045
7200	0,00007	0,00122	0,0022
9000	0,00004	0,0005	0,0008
10800	0,00003	0,00009	0,0003

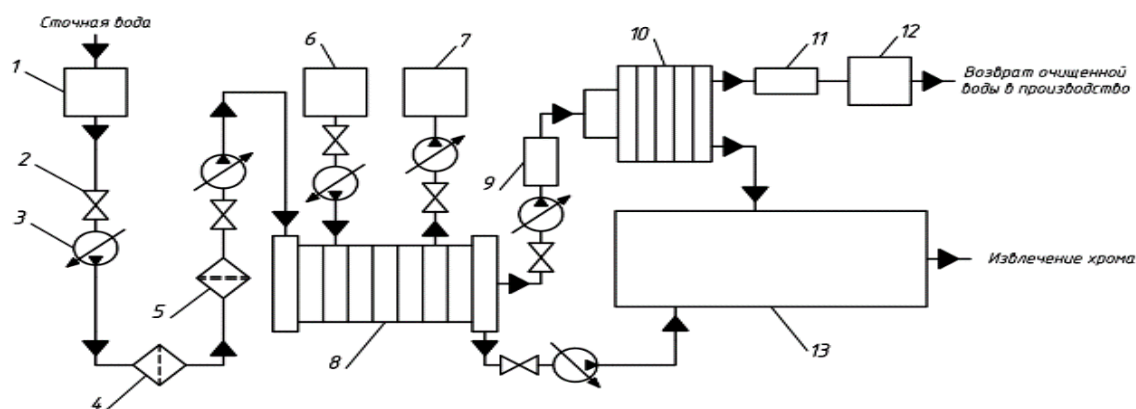


Рис. 2 – Разработанная технологическая схема очистной системы на гальваническом производстве: 1 – резервуар-усреднитель; 2 – вентиль; 3 – насос; 4 – механический фильтр; 5 – фильтр тонкой очистки; 6 – емкость с чистящими реагентами; 7 – емкость для сбора отработанных реагентов; 8 – электродиализатор; 9 – установка контроля и корректировки pH; 10 – модуль электродеионизационной очистки; 11 – установка контроля и корректировки pH; 12 – резервуар для очищенного раствора; 13 – резервуар для концентрата

Fig. 2 – Proposed process flow diagram for a wastewater treatment system in an electroplating plant: 1 – equalization tank; 2 – valve; 3 – pump; 4 – mechanical filter; 5 – fine filter; 6 – tank for cleaning reagents; 7 – tank for collecting spent reagents; 8 – electrodialyzer; 9 – pH monitoring and adjustment unit; 10 – electrodiolysis purification module; 11 – pH monitoring and adjustment unit; 12 – tank for purified solution; 13 – tank for concentrate

Далее раствор проходит через фильтр тонкой очистки, обеспечивающий дополнительное снижение содержания остаточных механических и коллоидных загрязнений.

Подготовленный таким образом сток поступает в электродиализный аппарат, в котором происходит разделение раствора с образованием обессоленной фазы и концентрата, обогащенного ионами хрома [13]. Образующийся концентрат отводится в специальную емкость и может быть использован для последующего извлечения ценных компонентов либо направлен на утилизацию. Для обеспечения стабильной работы электродиализного модуля предусмотрены отдельные емкости для хранения моющих реагентов и сбора отработанных промывочных растворов.

С целью достижения более высокой степени очистки обессоленный раствор далее направляется в электродеионизационный модуль, разработанный авторами. На данной стадии осуществляется глубокое удаление остаточных ионов за счет совместного действия электрического поля и ионообменных материалов. До и после электродеионизационной обработки проводится контроль и, при необходимости, корректировка значения pH раствора, что обеспечивает оптимальные условия протекания процесса.

Очищенная вода аккумулируется в накопительном резервуаре и может быть возвращена в технологический цикл предприятия, что способствует снижению водопотребления и экологической нагрузки. Концентрированный поток, образующийся в электродеионизационном модуле, также направляется в емкость для концентрата с целью дальнейшей переработки или утилизации.

Электродиализный аппарат функционирует при рабочих напряжениях 10-30 В и плотности тока 30-50 А/м². В указанных условиях достигается степень обессоливания до 90% при удельном энергопотреб-

лении в диапазоне 0,5–2,5 кВт·ч/м³. Производительность установки может варьироваться в зависимости от исходной минерализации раствора и составляет в среднем 1 м³/ч. Разделение осуществляется с использованием чередующихся катионообменных и анионообменных мембран, обеспечивающих селективный перенос ионов.

В процессе электродиализа под действием электрического поля реализуется направленная миграция ионов. В результате формируются два потока: дилюат (обессоленный раствор) и концентрат, обогащенный целевыми компонентами. Эффективность процесса определяется не только электрическими параметрами, но и степенью концентрационной поляризации, а также гидродинамическими условиями в каналах аппарата.

Электродеионизационный модуль работает при значениях напряжения 10-20 В и плотности тока 30-50 А/м², что обеспечивает глубину удаления ионов до 99%. Удельное энергопотребление составляет 1–3 кВт·ч/м³.

Отличительной особенностью электродеионизации является совмещение нескольких механизмов массопереноса: электромиграции ионов в электрическом поле, ионного обмена на поверхности смол и непрерывной электрохимической регенерации ионообменной загрузки. Последняя осуществляется за счёт диссоциации воды на ионы H⁺ и OH⁻ в зонах повышенной напряжённости электрического поля, что исключает необходимость применения химических реагентов для регенерации.

Экономическая эффективность предложенной технологической схемы очистки сточных вод, основанной на последовательном применении электродиализного и электродеионизационного аппаратов, оценивалась с учётом капитальных и эксплуатационных затрат, а также потенциального экономического эффекта от вовлечения извлечённых солей во вторичный хозяйственный оборот [14-18].

Расчёты выполнены для режима работы установки продолжительностью 8 часов в сутки при 22 рабочих днях в месяц. Ежемесячный объём очищаемых сточных вод составляет 10 000 м³.

Суммарная установленная мощность технологического оборудования составляет 45 кВт и включает насосное оборудование, электродиализатор, модуль электродеионизационной очистки и вспомогательную электронику.

Таблица 2 – Энергопотребление

Table 2 – Energy Consumption

Оборудование	Кол-во	Мощность, кВт
Насосы	6	6 · 4 = 24
Электродиализатор	1	10
Электродеионизационный модуль	1	10
Вспомогательная электроника	–	1
Итого		45 кВт

Месячное электропотребление при заданном режиме эксплуатации составляет 7 920 кВт·ч, что при тарифе на электроэнергию 13,086 руб./кВт·ч (цена на 2025 год по Тамбовской области) соответствует затратам 103 635 тыс. руб. в месяц.

Затраты на оплату труда обслуживающего персонала, включающего лаборанта, технолога и слесаря, с учётом всех обязательных начислений составляют 120 тыс. руб. в месяц.

Капитальные вложения в оборудование составляют 12 млн руб. При нормативном сроке службы оборудования 10 лет величина амортизационных отчислений составляет 1,2 млн руб. в год или 100 тыс. руб. в месяц. Дополнительные затраты на техническое обслуживание оборудования оцениваются в 700 тыс. руб. в год, что соответствует 58,3 тыс. руб. в месяц.

Таким образом, суммарные эксплуатационные затраты на функционирование технологической схемы составляют 381, 97 тыс. руб. в месяц.

Таблица 3 – Суммарные ежемесячные затраты

Table 3 – Total Monthly Expenses

Статья затрат	руб./мес.
Электроэнергия	103 635
Зарплата персонала	120 000
Амортизация	100 000
Обслуживание	58 333
Итого	381 968 руб./мес.

При месячном объёме перерабатываемых сточных вод 10 000 м³ удельные затраты на очистку составляют 38,20 руб./м³.

Исходная концентрация солей в сточных водах составляет около 5 %, что соответствует 50 кг солей на 1 м³ раствора. С учётом экспериментально установленной средней степени очистки 0,97 и безвозвратных потерь в размере 15 % от исходного количества, масса извлечённых солей составляет 412,25 т в месяц.

При рыночной стоимости соледержащей порошковой смеси, используемой в строительстве, на уровне 2 руб./кг потенциальный экономический эффект от реализации извлечённого продукта составляет 824,5 тыс. руб. в месяц.

Безвозвратные потери воды в процессе очистки оцениваются на уровне 15 % от исходного объёма сточных вод и составляют 1 500 м³ в месяц. При стоимости холодной воды 40,52 руб./м³ затраты на восполнение потерь составляют 60,8 тыс. руб. в месяц.

Чистый экономический эффект от внедрения предложенной технологической схемы с учётом эксплуатационных затрат и расходов на восполнение потерь воды составляет 381,7 тыс. руб. в месяц, что соответствует 4,58 млн руб. в год.

За нормативный срок службы оборудования, равный 10 годам, суммарный экономический эффект достигает 45,81 млн руб., что превышает первоначальные капитальные вложения более чем в четыре раза.

Заключение

Результаты расчётов показывают, что предложенная технологическая схема очистки сточных вод с использованием электродиализного и электродеионизационного аппаратов является технически и экономически целесообразной. Высокая степень извлечения загрязняющих компонентов, возможность их дальнейшего использования в качестве вторичного сырья, а также относительно низкие удельные затраты на очистку обеспечивают значительный экономический эффект при длительной эксплуатации установки.

Литература

- О. Р. Каратаев, Е. С. Кудрявцева, И. Х. Мингазетдинов, *Вестник Технологического университета*, **4**, 183-185 (2025)
- Е.Г. Филатова, *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*, **2**(13), 97–109 (2015).
- Д. В. Мытько, Л. А. Шибика, II Международная научно-практическая конференция молодых ученых, приуроченная ко Всемирному дню Водных ресурсов (Брест, Республика Беларусь, 28 марта, 2025). Брестский государственный технический университет, 2025. С. 69-72. – EDN EFWMLS.
- С. В. Буренков, А. Н. Грачев, С. В. Свергузова, Р.З. Галимова, И.Г. Шайхив, *Вестник Технологического университета*, **29** (1), 80-88 (2026). DOI 10.55421/3034-4689_2026_29_1_80. – EDN CVVIKR.
- L. Alvarado, A. Chen, *Electrochimica Acta*, **132**, 583 – 597 (2014). DOI:10.1016/j.electacta.2014.03.165.
- М.Р. Яковлева, О.К. Никулина, О.В. Колоскова, О.В. Дымар, *Пищевая промышленность: наука и технологии*, **16**(4), 61-68 (2023).
- Q. Jin, W. Yao, X. Chen, *Desalination and water treatment*, **183**, 301-306, (2020). DOI: 10.5004/dwt.2020.25099.
- М. И. Михайлин, С. И. Лазарев, И. В. Хорохорина, К. К. Полянский, *Вестник Технологического университета*, **25** (7), 60-63 (2022). DOI 10.55421/1998-7072_2022_25_7_60. – EDN RHNJDI.
- R. Zhou, J. Li, Y. Dai, F. Liu, S. Yang, H. Ren, C. Zhang, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**(4), Article 113178 (2024).
- Пат. Российская Федерация, RU 2835448 C1 (2025).
- Авт. свид. СССР 701655 (1977).
- Пат. Российская Федерация RU 2813880 C1 (2024).

13. Пат. Российская Федерация RU 2846574 (2025).
14. А. М. Азимов, А. Камшыбаев, Н. Н. Исабаев, *Central Asian Economic Review*, **2**(149), 117 – 128 (2023). DOI: 10.52821/2789-4401-2023-2-117-128
15. В. И. Пикуза, *Экономические расчеты и бизнес-моделирование в Excel*. Питер, СПб., 2012. 400 с.
16. Т.П. Некрасова, А.Е. Крючихина, *π-Economy*, №2-1 (144), 64-72 (2012).
17. Д. Н. Коновалов, И. В. Хорохорина, О. С. Филимонова, С. И. Лазарев, *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*, № 3(93), 30-39 (2024). DOI 10.17277/voprosy.2024.03.pp.030-039. – EDN CUHCCI.
18. А.В. Казанова, *Прикладные экономические исследования*, **5**(39), 24-28 (2020).
7. Q. Jin, W. Yao, X. Chen, *Desalination and water treatment*, **183**, 301-306, (2020). DOI: 10.5004/dwt.2020.25099.
8. M. I. Mikhailin, S. I. Lazarev, I. V. Khorokhorina, K. K. Pol'yansky, *Herald of Technological University*, **25** (7), 60-63 (2022). DOI 10.55421/1998-7072_2022_25_7_60. – EDN RHNJDI.
9. R. Zhou, J. Li, Y. Dai, F. Liu, S. Yang, H. Ren, C. Zhang, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**(4), Article 113178 (2024).
10. Pat. Russian Federation, RU 2835448 C1 (2025).
11. Auth. certificate USSR 701655 (1977).
12. Pat. Russian Federation RU 2813880 C1 (2024).
13. Pat. Russian Federation RU 2846574 (2025).
14. A.M. Azimov, A. Kamshybayev, N.N. Isabayev, *Central Asian Economic Review*, **2**(149), 117 – 128 (2023). DOI: 10.52821/2789-4401-2023-2-117-128
15. V. I. Pikuza, *Economic Calculations and Business Modeling in Excel*. St. Petersburg, 2012. 400 p.
16. Т.П. Некрасова, А.Е. Крючихина, *π-Economy*, №2-1 (144), 64-72 (2012).
17. Д. Н. Коновалов, И. В. Хорохорина, О. С. Филимонова, С. И. Лазарев, *Issues of Modern Science and Practice. Vernadsky University*, № 3(93), 30-39 (2024). DOI 10.17277/voprosy.2024.03.pp.030-039. – EDN CUHCCI.
18. А.В. Казанова, *Applied Economic Research*, **5**(39), 24-28 (2020).

References

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024-0011).

© **И. В. Хорохорина** – д-р тех. наук, доцент, доцент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), Тамбов, Россия, kotelnikovirina@yandex; **О. С. Филимонова** – аспирант, ТГТУ, nauka2613@mail.ru; **С. И. Лазарев** – д-р тех. наук, профессор, зав. кафедрой «Механика и инженерная графика», ТГТУ, lazarev.sergey.1962@mail.ru.

© **I. V. Khorokhorina** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Nature Management and Environmental Protection, Tambov State Technical University (TSTU), Tambov, Russia, kotelnikovirina@yandex; **O. S. Filimonova** – PhD-student, nauka2613@mail.ru; **S. I. Lazarev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of the Department of Mechanics and Engineering Graphics, TSTU, sergey.lazarev.1962@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 01.03.26.

Дата принятия рукописи в печать – 29.04.26.